

Итак, приведенный выше материал показывает, что, во-первых, в отличие от газотурбинного наддува, при котором влияние КПД компрессора и турбины на эффективный КПД дизеля незначительно [4], при механическом турбонаддуве двухтактных дизелей НТМ это влияние увеличивается с ростом давления наддува, причем приоритет в совершенствовании характеристик агрегатов системы наддува должен быть отдан в первую очередь компрессору, и, во-вторых, метод малых отклонений [3] может быть использован при определении расчетного режима для проектируемых компрессора и турбины системы механического турбонаддува двухтактного дизеля НТМ.

Список литературы:

1. Рязанцев Н.К. *Современные украинские танковые дизели // Двигателестроение*. – 2001. – № 3. – С. 4–5. 2. Рязанцев Н.К., Краюшкин И.А., Грицюк А.В. *Конверсионные и малолитражные двигатели для народного хозяйства // Двигателестроение*. –

2001. – № 3. – С. 3–4. 3. Погодин С.И. *Рабочие процессы транспортных турбопоршневых двигателей*. – М.: Машиностроение, 1978. – 312 с. 4. Портнов Д.А. *Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия*. – М.: Машигиз, 1963. – 640 с. 5. *Результаты испытаний тракторного двигателя В-42 с турбонаддувом / В.И. Бутов, В.Я. Ласюченко, С.М. Музикус, Ю.А. Епанешников, Г.Б. Бурман // Тракторы и сельхозмашины*. – 1968. – № 10. – С. 9–12. 6. Перерва П.Я. *Форсирование танкового двухтактного дизеля с прямоточной продувкой до 45 кВт/л при улучшении его технико-экономических показателей за счет разработки рациональной газозооной системы: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02*. – Харьков, 1983. – 198 с. 7. Рязанцев Н.К., Анимов Ю.А. *Особенности работы центробежного компрессора в системе наддува двухтактного турбопоршневого транспортного двигателя // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.* – Харьков «ХАИ», 2001. – Вып. 23. – С. 49–53.

УДК 621.43:662.6/8

А.П. Марченко, д-р техн. наук, А.Ф. Минак, канд. техн. наук, И.А. Слабун, канд. техн. наук, А.А. Осетров, асп., О.Ю. Линьков, асп., К.В. Марков, асп., Д.Н. Аскрепов, инж.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ТОКСИЧНОСТИ ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ТОПЛИВАХ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Введение

В условиях истощения мировых запасов нефти и газа актуальным становится поиск альтернативных видов сырья для производства моторных топлив. Эта проблема еще более остро стоит перед Украиной, импортирующей большую часть нефти и газа. Поэтому в последнее время большой интерес стали вызывать возобновляемые источники энергии растительного происхождения, в том числе растительные масла и их эфиры. В статье представлены результаты исследования рабочего процесса и токсичности отработавших газов (ОГ) дизеля СМД-23 при его работе на смесях рапсового масла (РМ) с дизельным топливом (ДТ), а также этиловом эфире рапсового масла (ЭЭРМ). Исследования проведены кафедрой ДВС НТУ «ХПИ» совместно с ОАО ГСКБД. Указанная работа ведется в рамках программ, выполняемых по бюджетной тематике.

Цели и задачи исследования

В работе [1] представлены предварительные результаты испытаний, касающиеся, в основном, токсичности ОГ дизеля при использовании указан-

ных выше топлив. Тенденции изменения выхода вредных веществ с ОГ дизеля при использовании альтернативных топлив растительного происхождения видны из рис. 1. Здесь приведены данные, полученные при работе дизеля на нагрузочных характеристиках с частотой вращения коленчатого вала, соответствующей режимам номинальной мощности $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и максимального крутящего момента $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$. Из представленных данных видно, что при использовании добавок растительных масел к ДТ, а также при работе дизеля на чистом ЭЭРМ на режимах с большими нагрузками, в основном, происходит снижение образования СО, сажи и небольшой рост выбросов NO (за исключением ЭЭРМ, для которого выбросы NO снижаются). На режимах малых нагрузок выбросы СО и сажи растут, а NO снижаются.

Для объяснения выявленных закономерностей были проведены исследования рабочего процесса и токсичности дизеля. В их ходе ставились следующие задачи:

- получение более полных данных о составе отработавших газов дизеля;
- исследование физико-химических свойств топлив;

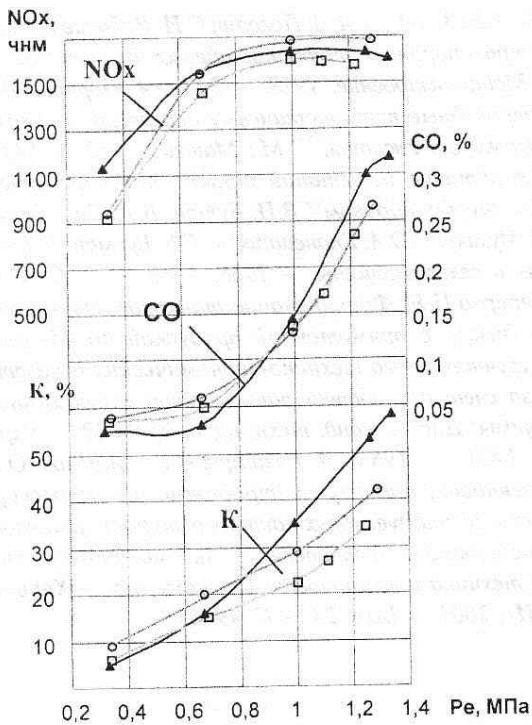
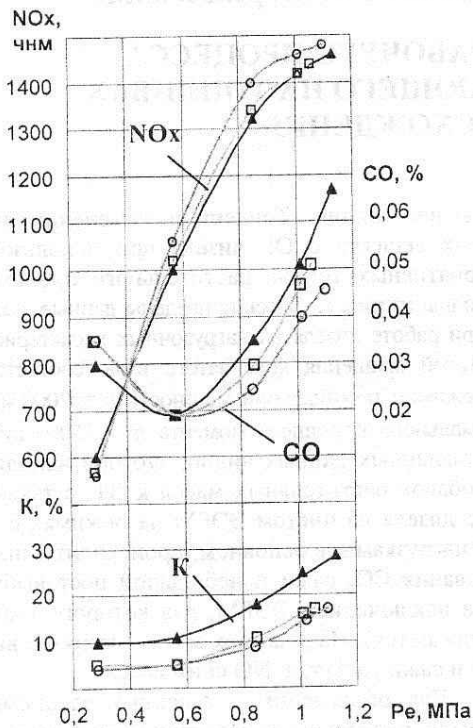
а) $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ б) $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

Рис. 1. Влияние нагрузки на токсичность ОГ дизеля

(— ДТ;
 — смесь 75%РМ+25%ДТ;
 — ЭЭРМ)

— расчетно-экспериментальное исследование рабочего процесса дизеля.

Хроматографическое исследование

В рамках первого этапа исследований в ходе испытаний дизеля были отобраны пробы отработавших газов и в лаборатории высоких давлений НТУ «ХПИ» кафедрами ДВС и ТНВ проведен их хроматографический анализ.

Хроматографический анализ выполнялся для проб газов, полученных на режимах высоких ($Pe = 1,25 \text{ МПа}$ и $Pe = 1,01 \text{ МПа}$) и средних ($Pe = 0,57 \text{ МПа}$ и $Pe = 0,67 \text{ МПа}$) нагрузок при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$. Концентрации O_2 , N_2 , CO , CH_4 в отработавших газах определялись на хроматографе «ЛХМ8 МД», H_2 — на хроматографе марки «Цвет 4-67». Расчет концентраций компонентов ОГ проведен методом абсолютной калибровки по каждому определяемому компоненту.

Из-за конденсации паров воды, содержащейся в ОГ, на стенках пробоотборников, концентрации компонентов, определенные хроматографически, являются завышенными. Поэтому была проведена оценка истинных концентраций компонентов ОГ с учетом доли паров воды в выпускном коллекторе (рис. 2).

На этом рисунке не приведены данные по метану, поскольку его содержание в отработавших газах оказалось ниже чувствительности хроматографического анализа по CH_4 (0,012% объемных).

Результаты анализа по выходу CO с ОГ, полученные хроматографически и прямыми измерениями прибором 121ФА-01, для различных топлив хорошо согласуются между собой.

По содержанию CO и H_2 в ОГ можно сделать оценку полноты сгорания углеводородов в дизеле, поскольку выход CO характеризует полноту сгорания, а выход H_2 — и полноту крекинга топлива. Если предположить, что количество несгоревших углеводородов в камере сгорания (КС) дизеля подчиняется тем же закономерностям, что и образование других продуктов неполного сгорания (CO , сажа, H_2 и др.), то одновременное снижение CO и H_2 с ростом доли рапсового масла в дизельном топливе для высоких нагрузок (см. рис. 2) будет означать снижение выбросов несгоревших углеводородов с ОГ, в том числе канцерогенных. На режимах малых нагрузок выход углеводородов либо не изменится, либо увеличится.

Исследование физико-химических свойств топлив растительного происхождения

В рамках второго этапа кафедрой ДВС НТУ «ХПИ» совместно с Углекимическим институтом были проведены исследования физико-химических свойств образцов дизельного топлива, рапсового масла и этилового эфира рапсового масла. Эти и другие, более ранние, результаты исследований свойств топлив приведены в таблице 1.

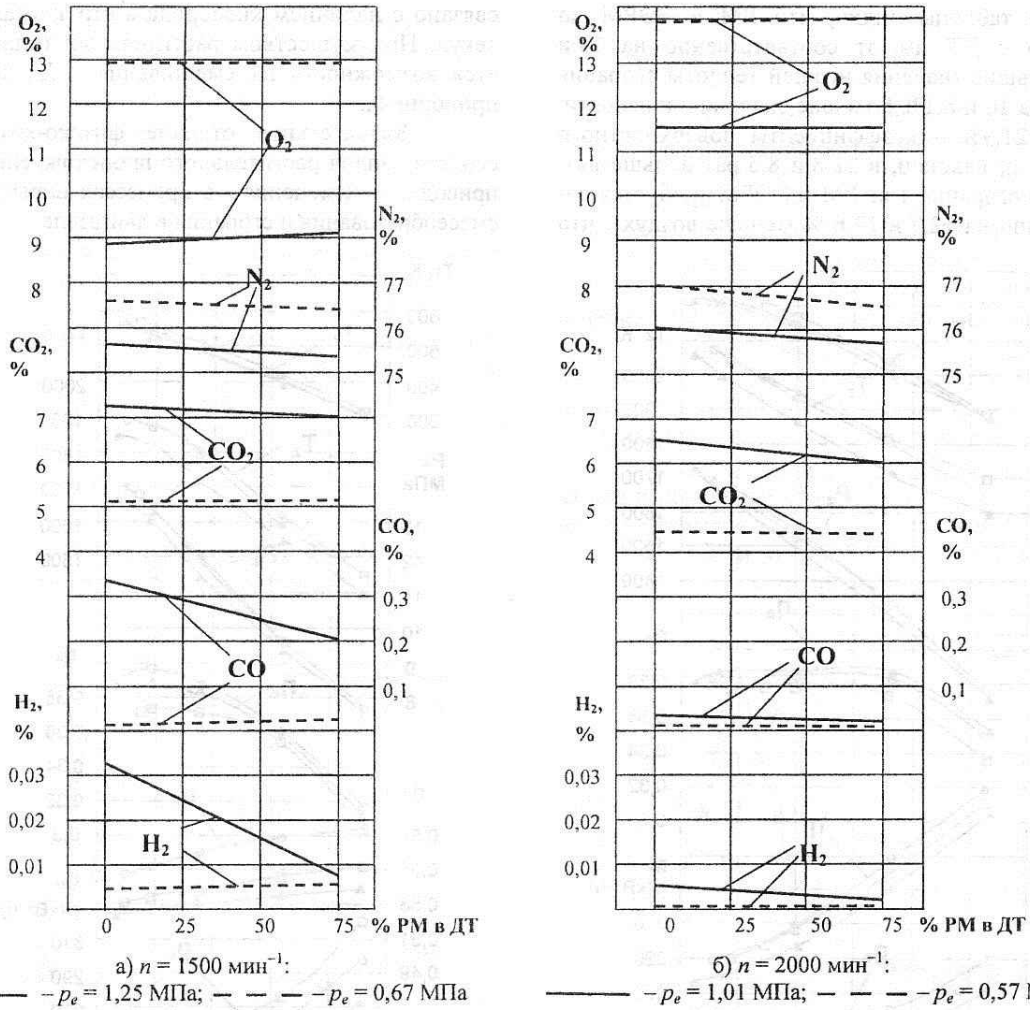


Рис. 2. Влияние добавки РМ в ДТ на состав ОГ дизеля. Концентрации N_2 , O_2 , CO_2 , CO , H_2 скорректированы с учетом конденсации паров воды, содержащейся в ОГ, на стенках пробоотборников

Таблица 1. Физико-химические свойства АТ растительного происхождения

	ДТ	РМ	ЭЭРМ	ДТ+РМ 75/25	ДТ+РМ 50/50	ДТ+РМ 25/75
Весовые %	100	100	100	73,01/26,99	47,41/52,59	23,11/76,89
С, %	87	77,91	77,54	84,46	82,05	79,76
Н, %	12,56	11,86	12,04	12,28	12,01	11,76
О, %	0,4	10,23	10,42	3,23	5,92	8,47
С, %	0,04	0	0	0,03	0,02	0,01
L_0 , кг/кг	14,385	12,661	12,677	13,94	13,45	12,98
Q_v , МДж/кг	44,953	39,344	39,165	43,4	42,0	40,6
$Q_{нв}$, МДж/кг	42,211	36,755	36,874	40,7	39,3	38,0
$Q_{нв}$, МДж/дм ³	34,82	33,63	33,0	34,5	34,194	33,91
ρ , кг/м ³ (20°С)	825	915	895	849,3	872,3	894,2
ν , мм ³ /с (20°С)	3,8	87	32,48	26,3	47,6	67,8
$\sigma \cdot 10^3$, Н/м (20°С)	28,9	33,3	36	30,1	31,2	32,3

Из таблицы видно, что РМ и ЭЭРМ по сравнению с ДТ имеют соответственно на 14 и 13,5% меньшие значения низшей теплоты сгорания топлива, на 10 и 8,1% большие значения плотности, на 14,1 и 21,9% – коэффициенты поверхностного натяжения и, наконец, в 22,8 и 8,5 раз больше вязкость. Для сгорания 1 кг РМ и ЭЭРМ требуется соответственно на 12,7 и 12,6 % меньше воздуха, что

связано с наличием кислорода в структурах их молекул. Преимуществом растительных топлив является возможность их смешивания с ДТ в любых пропорциях.

Значительное отличие физико-химических свойств топлив растительного происхождения от ДТ приводит к изменениям в процессах впрыскивания, смесеобразования и сгорания в двигателе.

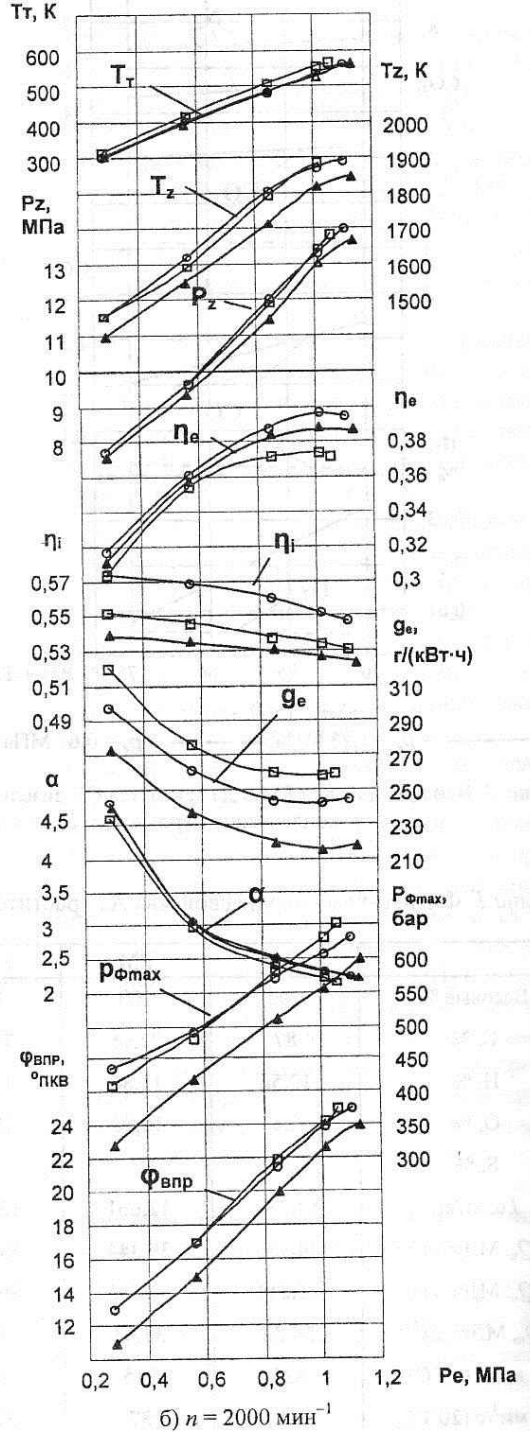
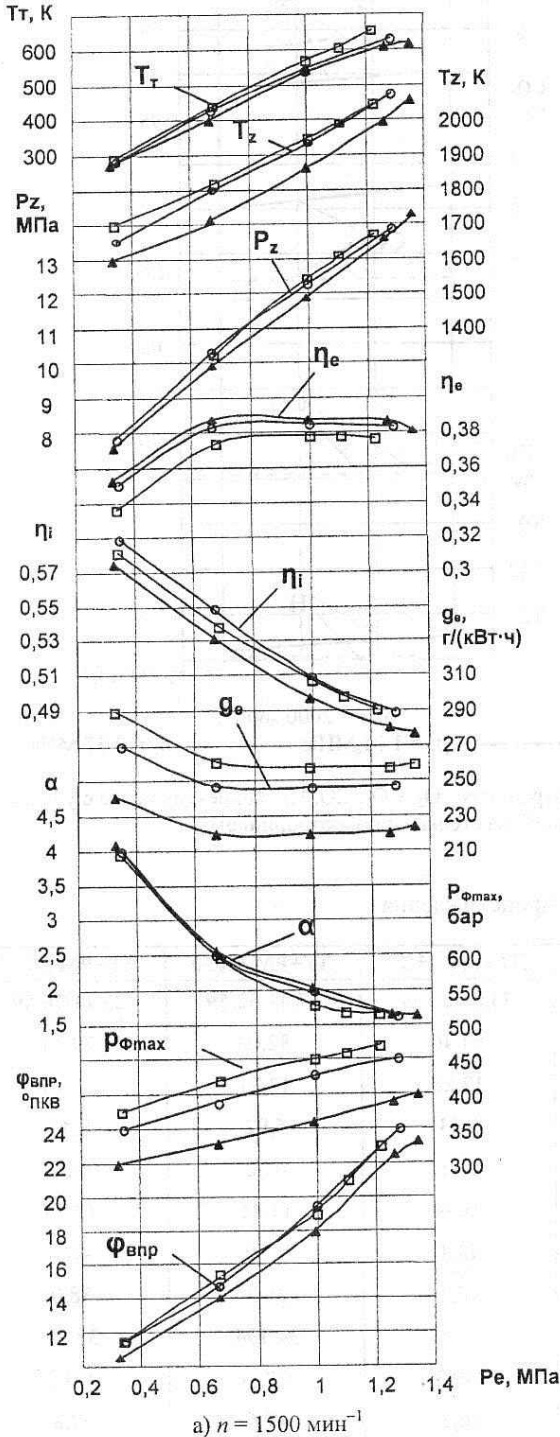


Рис. 3. Влияние нагрузки на показатели рабочего процесса дизеля

(—▲—) — ДТ; (—○—) — смесь 75%РМ+25%ДТ; (—□—) — ЭЭРМ)

Особенности смесеобразования и сгорания растительных топлив в дизеле

В рамках третьего этапа исследовались особенности рабочего процесса дизеля при использовании топлив растительного происхождения.

Вследствие меньшей сжимаемости и большей вязкости впрыскивание растительных топлив в камеру сгорания дизеля осуществляется с большими максимальными давлениями $p_{\Phi max}$, чем впрыскивание дизельного топлива (рис. 3).

Большие силы поверхностного натяжения и большая кинематическая вязкость обеспечивают более поздний распад струи растительных топлив на капли с образованием меньшего угла конуса распыливания [2]. При этом значительно растет средний диаметр капель по Заутеру [2].

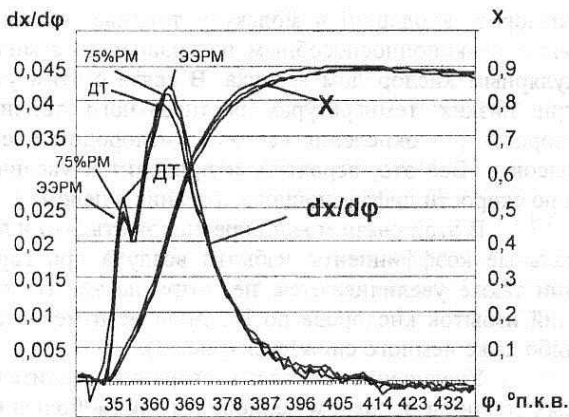
Впрыскивание растительных топлив с большими максимальными давлениями, большие диаметры капель в сочетании с большим удельным весом

увеличивают пробивную способность и дальность топливного факела.

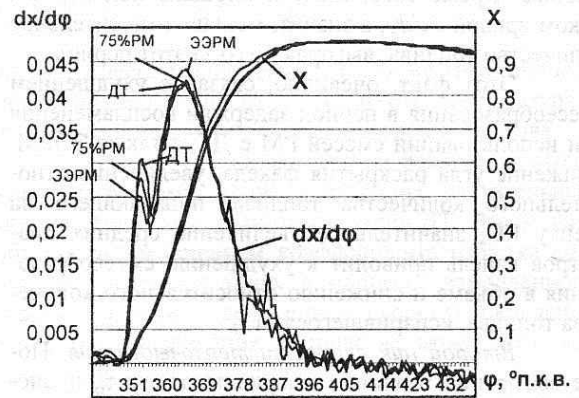
Продолжительность подачи растительных топлив растет незначительно (1–2 °п.к.в.) вследствие значительного увеличения давлений впрыскивания при небольшом увеличении объемной цикловой подачи.

Указанные выше факторы приводят к тому, что доля объемного смесеобразования при использовании растительных топлив снижается и увеличивается доля пристенно-плечного смесеобразования. Качество объемного смесеобразования при этом снижается.

Процессы воспламенения и сгорания в цилиндре дизеля можно условно разделить на четыре периода: задержки воспламенения τ_i , выгорания топлива, испарившегося за τ_i (первый пик на графике $dx/d\phi$), основного горения (второй пик на графике $dx/d\phi$) и период замедленного горения, длящийся до начала открытия выпускных клапанов [3]. Рассмотрим особенности этих периодов при использовании топлив растительного происхождения.



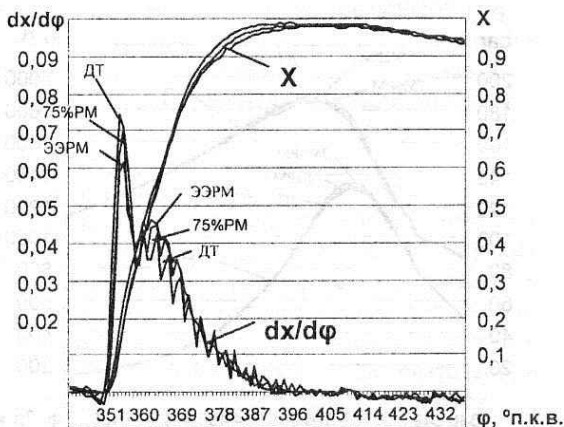
а)



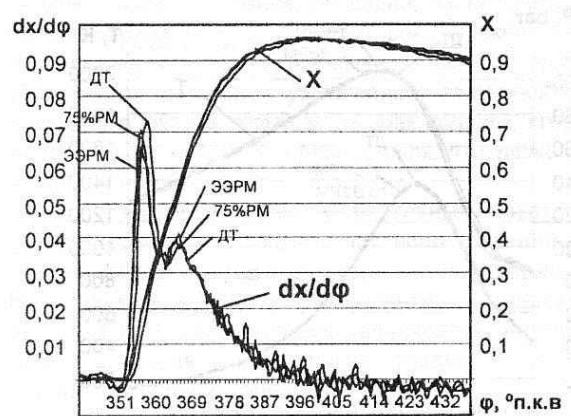
б)

Рис. 4. Характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля:

а) $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 1,25 \text{ МПа}$; б) $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 1,01 \text{ МПа}$



а)



б)

Рис. 5. Характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля:

а) $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,67 \text{ МПа}$; б) $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,57 \text{ МПа}$

Период задержки воспламенения. В результате обработки экспериментальных индикаторных диаграмм были получены интегральные и дифференциальные характеристики тепловыделения в цилиндре во всем диапазоне топливных смесей и нагрузок. На рис. 4, 5 приведены характеристики тепловыделения ДТ, ЭЭРМ и смеси 75%РМ+25%ДТ на режимах высоких ($p_e = 1,25$ МПа и $p_e = 1,01$ МПа) и средних ($p_e = 0,57$ МПа и $0,67$ МПа) нагрузок при $n = 1500$ мин⁻¹ и $n = 2000$ мин⁻¹. Из анализа этих и других характеристик трудно заметить какие-либо закономерные отличия в периоде задержки воспламенения растительных топлив от дизельного топлива. Следовательно, можно предположить, что воспламеняемость РМ и ЭЭРМ практически не изменяется по сравнению с воспламеняемостью ДТ.

Первый пик скорости тепловыделения. Из рис. 4, 5 видно, что для большинства режимов максимальная скорость тепловыделения для растительных топлив в этот период ниже, чем для дизельного топлива. Кроме того, ниже и площадь под первым пиком кривой $dx/d\varphi$, а значит, меньше относительное количество топлива, выгорающего за этот период.

Этот факт, очевидно, связан с ухудшением смесеобразования в период задержки воспламенения при использовании смесей РМ с ДТ, а также ЭЭРМ. Снижение угла раскрытия факела, увеличение относительного количества топлива, попадающего на стенку КС, значительное увеличение средних диаметров капель приводит к ухудшению смесеобразования в объеме и снижению относительного количества топлива, испарившегося за τ_i .

Второй пик скорости тепловыделения. После выгорания топлива, испарившегося за τ_i , происходит диффузионное сгорание капель в топливном факеле, а также топлива, испаряющегося со стенки КС при попадании факела на стенку. Характер протекания процесса сгорания в этот период определяет индикаторные показатели цикла [3].

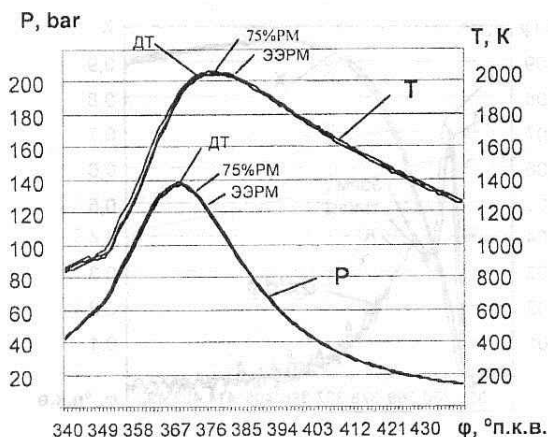
В опытном двигателе использовалась цилиндрическая камера сгорания, в которой реализовано объемно-пленочное смесеобразование. Полученные данные (рис. 4, 5) на первый взгляд являются противоречивыми. Увеличение количества топлива, попадающего на стенку, большие диаметры капель, неоднородность распыливания при использовании растительных топлив должны приводить к снижению скорости испарения и сгорания топлива, особенно на режимах малых нагрузок, когда стенка имеет низкую температуру. Однако видно, что практически на всех режимах происходит увеличение скорости сгорания по сравнению с ДТ.

Ухудшение смесеобразования в объеме в этом случае не приводит к снижению скорости сгорания не только на режимах высоких нагрузок, но и на режимах низких нагрузок.

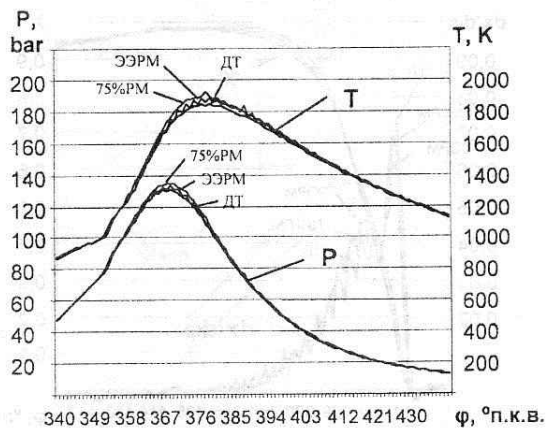
Интенсификацию диффузионного сгорания растительных топлив, очевидно, можно объяснить наличием кислорода в структуре молекулы. При горении капли топлива растительного происхождения кислород, входящий в молекулу топлива, является более реакционноспособным по сравнению с молекулярным кислородом воздуха. В связи с этим уже при низких температурах растительного топлива скорость его окисления «своим» кислородом очень высокая. Все это, вероятно, и приводит к увеличению скорости диффузионного сгорания в целом.

В этой связи можно предположить, что и локальные коэффициенты избытка воздуха при горении также увеличиваются, несмотря на то, что общий избыток кислорода по КС либо не изменяется, либо даже немного снижается (рис. 3).

Увеличение скорости сгорания растительных топлив в основном периоде горения в большинстве случаев приводит к незначительному увеличению давлений и средних температур в цилиндре (рис. 3, 6, 7). Кроме того, растут температуры ОГ в выпускном коллекторе (рис. 3).



а)



б)

Рис. 6. Средние по цилиндру дизеля давления и температуры:
а) $n = 1500$ мин⁻¹, $p_e = 1,25$ МПа; б) $n = 2000$ мин⁻¹, $p_e = 1,01$ МПа

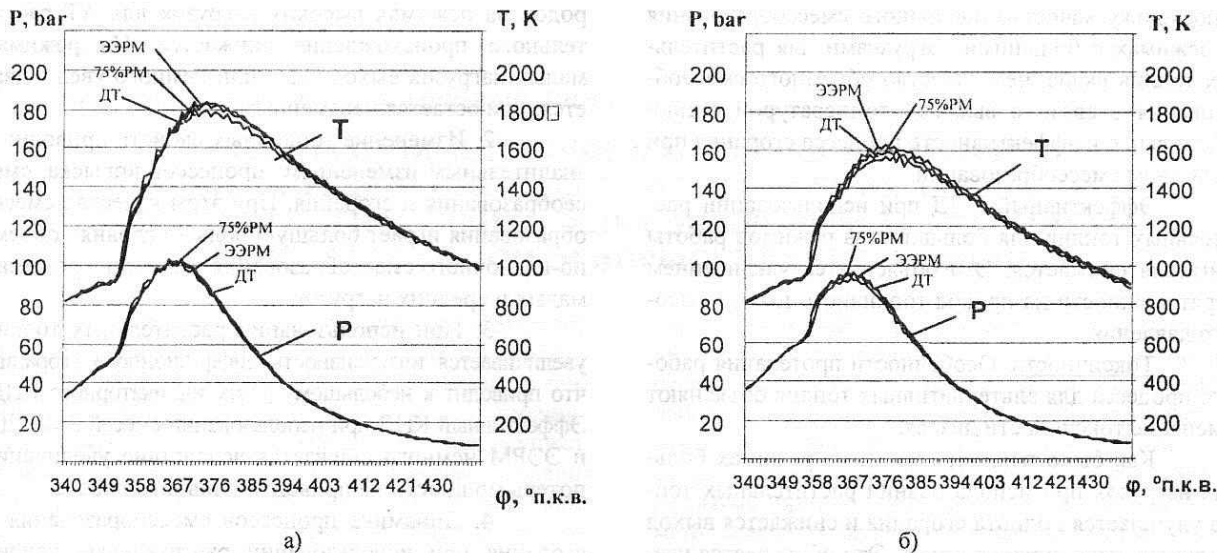


Рис. 7. Средние по цилиндру дизеля давления и температуры:
 а) $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,67 \text{ МПа}$; б) $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,57 \text{ МПа}$

Следует отметить соотношение между количествами топлива, сгорающего в течение первого и второго периодов горения. Эти количества напрямую зависят от режима работы двигателя. Из рис. 4, 5 видно, что на режимах больших нагрузок в течение первого периода выгорает 15–20% впрыснутого в КС топлива. В течение же второго периода выгорает 75–80% топлива. То есть при работе двигателя с большими нагрузками преобладает горение топлива в течение основного периода сгорания.

На режимах средних нагрузок (порядка 0,5...0,7 МПа) доля топлива, выгорающего в первый период, достигает уже 35–40%, а для малых нагрузок (порядка 0,2...0,3 МПа) эта доля еще выше – 65–70%. Следовательно, на режимах малых нагрузок преобладает горение испарившегося за период τ топлива.

На режимах высоких нагрузок соотношение между количествами топлива, выгорающего в первый и второй периоды, для РМ и ЭЭРМ изменяется незначительно по сравнению с ДТ. Это связано с малой долей первого периода в общей продолжительности сгорания. Значит, и характер процесса сгорания изменяется незначительно.

На режимах малых нагрузок доля топлива, сгорающего в первый период, для РМ и ЭЭРМ значительно меньше, чем для ДТ, что связано с ухудшением смесеобразования в объеме КС. Это приводит к увеличению количества топлива, сгорающего в процессах диффузионного горения крупных капель и у относительно холодных стенок КС. Следовательно, и качество процесса окисления должно измениться.

Период замедленного горения. В течение этого периода в цилиндре образуются зоны, в которых для полного сгорания топлива не хватает кислорода, и зоны, в которых имеется его избыток, что связано с замедлением вихревого движения заряда в

КС в процессе расширения [3]. Кроме того, процесс протекает при относительно низких температурах, что также замедляет процессы окисления топлива.

Из рис. 1, 2 видно, что на режимах с высокими нагрузками полнота сгорания растительных топлив выше, чем полнота сгорания ДТ. Это можно объяснить увеличением коэффициента избытка воздуха в локальных зонах в процессе замедленного горения, а также увеличением скорости окисления вследствие увеличения количества атомарного кислорода при использовании РМ и ЭЭРМ.

На режимах с низкими нагрузками основную роль в процессе сгорания играет качество объемного смесеобразования. В связи с ухудшением распыливания растительных топлив происходит значительное увеличение диаметров капель. Несмотря на увеличение интенсивности диффузионного сгорания растительных топлив, процесс сгорания, очевидно, растягивается на большее время, что ведет к некоторому снижению полноты сгорания и увеличению выхода CO , C_nH_m и сажи. Кроме того, в связи с увеличением дальности топливного факела повышается доля топлива, сгорающего у относительно холодных стенок, что также приводит к снижению полноты сгорания.

Индикаторные и эффективные показатели дизеля. Из рис. 3 видно, что при использовании растительных топлив практически на всех режимах работы двигателя происходит увеличение индикаторного КПД. Это объясняется увеличением интенсивности сгорания растительных топлив в течение периода основного горения.

Однако можно заметить, что рост η_i для смеси 75%РМ+25%ДТ больше, чем для ЭЭРМ. Это связано с увеличением доли объемного смесеобразования для ЭЭРМ по сравнению с РМ вследствие меньших значений вязкости и поверхностного натяжения.

А поскольку качество пленочного смесеобразования на режимах с большими нагрузками для растительных топлив выше, чем качество объемного смесеобразования в связи с высокой температурой стенки КС, то выше и эффективность процесса сгорания при пленочном смесеобразовании.

Эффективный КПД при использовании растительных топлив для большинства режимов работы двигателя снижается. Это объясняется увеличением затрат мощности на привод топливного насоса высокого давления.

Токсичность. Особенности протекания рабочего процесса для альтернативных топлив объясняют изменение токсичности дизеля.

Как было показано выше, на режимах больших нагрузок при использовании растительных топлив улучшается полнота сгорания и снижается выход продуктов неполного сгорания. Это объясняется увеличением локальных α и количества атомарного активного кислорода, участвующего в процессах окисления. Ухудшение полноты сгорания на режимах с низкими нагрузками объясняется значительным ухудшением качества смесеобразования в объеме КС, а также увеличением доли топлива, сгорающего у относительно холодных стенок.

На выход оксидов азота основное влияние оказывает содержание атомарного кислорода и величина температур в зоне продуктов сгорания [4]. При использовании растительных топлив значительно увеличивается количество атомарного кислорода, участвующего в реакциях горения. Вследствие повышения доли пленочного смесеобразования для РМ увеличивается неравномерность распределения топлива по КС, а значит, и неравномерность распределения α и температур. Все это ведет к тому, что выход NO на режимах больших нагрузок для РМ увеличивается.

При использовании ЭЭРМ происходит более равномерное распределение топлива по КС, чем для РМ, что ведет к снижению неравномерности полей α и температур по сравнению с РМ. Поэтому выход оксидов азота на режимах высоких нагрузок при использовании ЭЭРМ ниже, чем при использовании РМ, а на некоторых режимах выход NO ниже даже по сравнению с ДТ.

На режимах низких нагрузок выход NO для растительных топлив ниже по сравнению с ДТ. Как и в случае продуктов неполного сгорания, это объясняется значительным ухудшением смесеобразования, а также увеличением количества топлива, сгорающего в холодном пристеночном слое (снижением локальных температур).

Выводы

1. Из данных хроматографического анализа проб ОГ следует, что выход несгоревших углеводо-

родов на режимах высоких нагрузок для АТ растительного происхождения снижается. На режимах малых нагрузок выход C_nH_m или немного увеличивается, или остается неизменным.

2. Изменение топливных свойств приводит к значительным изменениям процессов впрыска, смесеобразования и сгорания. При этом качество смесеобразования играет большую роль в условиях объемно-пленочного смесеобразования именно на режимах малых и средних нагрузок.

3. При использовании растительных топлив увеличивается интенсивность диффузионного сгорания, что приводит к небольшому росту индикаторного КПД. Эффективный КПД при использовании смесей РМ с ДТ и ЭЭРМ немного снижается вследствие увеличения потерь мощности на привод топливного насоса.

4. Динамика процессов смесеобразования и сгорания при использовании растительных топлив определяет выход токсичных веществ с ОГ. Снижение выхода продуктов неполного сгорания на режимах с высокими нагрузками объясняется увеличением содержания кислорода в молекуле растительных топлив. На режимах с низкими нагрузками при использовании растительных топлив происходит увеличение выхода продуктов неполного сгорания вследствие значительного ухудшения смесеобразования в объеме КС, а также увеличения количества топлива, попадающего в относительно холодные пристеночные зоны, по сравнению с ДТ.

5. Увеличение выхода оксидов азота при использовании РМ на режимах с высокими нагрузками можно объяснить повышением содержания кислорода в молекуле, а также увеличением неравномерности распределения температур по КС. При использовании этилового эфира увеличивается доля объемного смесеобразования по сравнению с РМ, поэтому выход NO либо не изменяется по сравнению с ДТ, либо немного снижается. На режимах с низкими нагрузками выход оксидов азота при использовании растительных топлив снижается вследствие ухудшения смесеобразования, а также из-за увеличения доли топлива, сгорающего в холодных пристеночных зонах.

Список литературы:

1. Токсичность отработавших газов дизеля при использовании топлив растительного происхождения / А.П. Марченко, А.П. Строков, А.Ф. Минак, А.А. Осетров, О.Ю. Линьков // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – Вып. 1.
2. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. – М.: МАДИ(ТУ), 2000.
3. Ваншейдт В.А. Судовые двигатели внутреннего сгорания. – Л.: Судостроение, 1977.
4. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. – М.: Академия наук СССР, 1947.